

風化花崗岩の地盤工学特性の地域比較に関する一検討

服部隆行¹・M. M. GALER²・北川隆司³・徐連民⁴・小川保⁵・日下部治⁶

¹正会員 基礎地盤コンサルタンツ(株) 技術開発部地盤解析室 主任 (〒102-8220 東京都千代田区九段北1-11-5)

²学生会員 工学 広島大学 第4類建設工学専攻 (〒739-0046 東広島市鏡山11-4-1)

³正会員 理博 広島大学助教授 理学部地球惑星システム学科 (〒739-0046 東広島市鏡山1-3-1)

⁴正会員 工博 元 基礎地盤コンサルタンツ(株) 技術開発部地盤解析室 (〒102-8220 東京都千代田区九段北1-11-5)

⁵正会員 東京電力(株) 送変電建設本部 副部長 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

⁶正会員 Ph.D. 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1)

広島地方と阿武隈地方の風化花崗岩における地盤特性の地域比較を行い、風化度毎の静的な変形挙動の評価を目的として砂質土の弾塑性モデルを用いたシミュレーションを行った。検査結果から、両地方の風化花崗岩の地盤特性は、瀬戸内海の花崗岩を対象とした本四国産の岩盤分類の適用性が高く、圧縮・せん断挙動は、粒子破碎の卓越する降圧直前直後の初期骨格構造の影響が大きいことを示した。さらに、弾塑性モデルによるシミュレーション結果の有効性から、母岩の形成過程と風化状態を特定することにより、両地方の花崗岩の地盤特性には同等性が存在する可能性を示唆した。

Key Words : decomposed granite, undisturbed sample, compression test, shearing test, t_{ij}-sand model, particle crushing, soil structure

1. はじめに

筆者らは、花崗岩を母岩とする風化花崗岩の基礎的な地盤工学的特性の把握を目的として、継続的な原位試験及び不攪乱試料を対象とした室内試験を実施し、報告してきた^{1)・2)}。そして、風化花崗岩を構成する各鉱物毎の室内試験結果から、風化花崗岩の力学特性は鉱物毎の粒子破碎特性の影響による骨格構造の変化に支配されることを示した。また、筆者らの一部³⁾は、風化花崗岩の力学特性は母岩の構成や風化程度の影響から沖積粘性土地盤と比較して自己相関距離が短く、その地域移転性には慎重な配慮が必要であるとの立場での検討を行ってきた。

本報告では、母岩の地質形成時代がほぼ同一である広島及び阿武隈地方における風化花崗岩の地盤工学特性を比較・検討し、また、風化度毎の静的な変形挙動の評価を目的として砂質土の弾塑性モデル(*t_{ij}-sand model*⁴⁾)を用いたシミュレーション結果を報告する。

2. 検討地点の地形・地質概要及び風化特性の比較

本章は、検討地点(主に阿武隈地方)の地形・地質の概要と花崗岩の風化・鉱物学的特徴を検討し、

広島及び阿武隈地方の相互比較結果を報告する。なお、広島地方の特徴は前報¹⁾で詳述していることから、表-1に要点を示した。

(1) 地形・地質

対象地域は、阿武隈山地のほぼ中央に位置し、周辺地域には標高500~800mの起伏を伴う丘陵地が広がっている。

調査地点付近の花崗岩類は、時代はジュラ紀から白亜紀に形成された花崗閃緑岩と黒雲母花崗岩の2種類である⁵⁾。調査地域の黒雲母花崗岩の岩相は中粒で、淡紅色の正長石の斑状結晶を含み、また、花崗閃緑岩は黒雲母花崗岩よりやや細粒で、同じく斑状組織となる特徴を示す。これらの表層部は、尾根部で20~30m、谷部では10~20mの部分が著しく風化変質を受け、「マサ化」していた。

なお、広島地方で確認された明確なシーティングジョイントの存在は、当該地区では認められなかった。

(2) 風化・鉱物学的特徴

2種類の花崗岩類の主構成鉱物(石英, 正長石, 斜長石, 黒雲母)の体積比は、光学顕微鏡観察結果(写真-1)から、黒雲母花崗岩は30%, 24%, 35%, 8%となり、花崗閃緑岩は39%, 5%, 42%,

表-1 対象地点の地形地質概要一覧

地方	広島	阿武隈
地形	丘陵地	丘陵地
標高	270m	500~800m
岩種	黒雲母花崗岩	花崗閃緑岩
生成時代	白亜紀	ジュラ紀~白亜紀
岩相	中粒・斑状	細~中粒・斑状
構成鉱物	石英(40%)・正長石(32%) 斜長石(22%)・黒雲母(6%)	石英(39%)・正長石(5%) 斜長石(42%) 黒雲母(9%)・角閃石 斜方輝石
含有粘土 鉱物	パーミキュライト ハロイサイト カオリナイト	ハロイサイト・カオリナイト
シニク ジョイト	発達	未発達

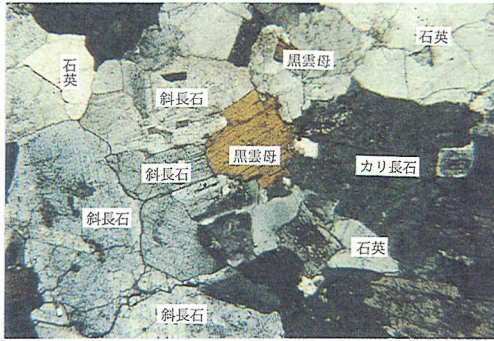


写真-1(1) 黒雲母花崗岩の偏光顕微鏡写真
(阿武隈地方(クロスニコル))

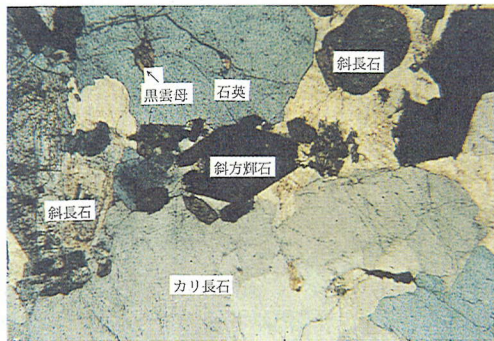


写真-1(2) 花崗閃緑岩の偏光顕微鏡写真
(阿武隈地方(クロスニコル))

9%であった。また、花崗閃緑岩は僅かに角閃石、斜方輝石を伴い、副成分鉱物として緑簾石やジルコンを含んでいた。両岩石組織は一見等粒状に見えるが、やや斑状を呈し、斑晶は石英、正長石、斜長石、黒雲母で、粒径は5~15mm、基質の結晶は1~5mmであった。新鮮な黒雲母花崗岩の正長石は薄いピンク色を呈し、両岩石の正長石はほとんど変質は認められないが、風化が進行すると白色化していた。また、両岩石の斜長石は変質が著しく、風化状態に大きな違いは認められなかった。

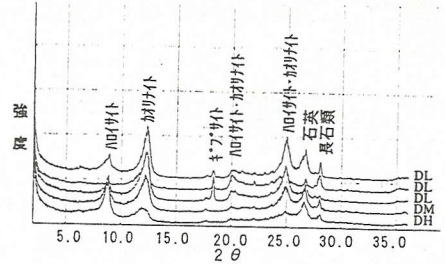


図-1 X線粉末回折結果
(黒雲母花崗岩の全岩の水ひ後、ホルムアミド処理)

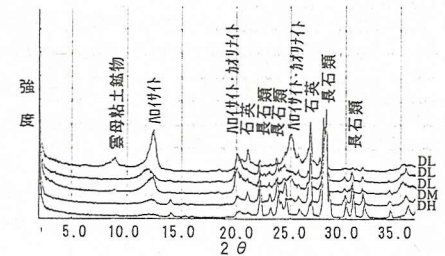


図-2 X線粉末回折結果
(斜長石粒子少量の石英を伴う)

本調査地点の黒雲母花崗岩における全岩の水ひ材料(2μm以下の粒子、ホルムアミド処理後)のX線粉末回折結果を図-1に示す。黒雲母花崗岩に生成している粘土鉱物はハロイサイトとカオリナイトであり、また、花崗閃緑岩との岩石種の違いによる差は認められなかった。一方、斜長石粒子によるX線粉末回折結果を図-2に示す。斜長石粒子内の粘土鉱物はハロイサイトを主体とし、ごく僅かに雲母粘土鉱物が含まれていた。薄片観察と併せて考えると、カオリナイトは黒雲母の風化生成物であり、斜長石における主な生成粘土鉱物はハロイサイトと推定される。新鮮な黒雲母花崗岩と花崗閃緑岩の鉱物毎の変質状況は以下の通りである。

「石英」：粒径0.1~15mmの灰白色を呈する硬質な結晶である。全体に微細で開口するか、包有物のうめた割れ目が発達するが、変質は認められない。

「正長石」：粒径0.2~15mmの薄いピンク色を呈し、微細な割れ目が発達する。変質は認められない。

「斜長石」：粒径0.2~15mmの白色短冊状結晶で、薄片観察では結晶の10~30%が変質し、粘土鉱物の生成が認められる。変質はおもに結晶中心付近のCaが多い部分で顕著である。

「黒雲母」：粒径は0.5~3mmで、緑褐色から褐色

表-2 物理定数及び弾性波探査結果

地域	岩級区分	比重		含水比		湿潤単位体積重量			乾燥単位体積重量			間隙比			Vp			Vs				
		Gs		Wn(%)		$\gamma_t(\text{KN/m}^3)$			$\gamma_d(\text{KN/m}^3)$			e			(km/sec)			(km/sec)				
		sample	avg.	C.O.V.	sample	avg.	C.O.V.	sample	avg.	C.O.V.	sample	avg.	C.O.V.	sample	avg.	C.O.V.	sample	avg.	C.O.V.	sample	avg.	C.O.V.
広島	DL	—	2.66	—	96	9.1	38.0	96	17.1	3.0	96	15.9	7.0	96	0.64	18.0	3	0.43	—	2	0.26	—
	DH	—	2.68	—	90	2.0	70.0	90	21.2	4.0	90	20.8	5.0	90	0.26	24.0	2	1.72	—	2	1.18	—
阿武隈	DL	133	2.67	0.7	133	18.9	18.5	133	19.0	4.2	133	16.0	6.1	133	0.64	15.6	48	0.63	33.3	48	0.28	17.9
	DM	118	2.68	0.7	118	13.1	22.1	116	20.6	3.4	116	18.2	5.4	116	0.45	17.7	67	1.15	40.0	67	0.38	23.7
	DH	38	2.70	0.7	38	8.5	27.1	38	22.0	2.7	38	20.3	3.8	38	0.31	15.4	132	2.37	21.9	131	0.61	16.4

を呈し、劈開面にそって一部変質が認められる。一部の結晶は緑泥石化している。

(3) 広島地方と阿武隈地方の地質・風化の比較

両調査地点の花崗岩類は、主構成鉱物のモード組成(石英, 正長石, 斜長石, 黒雲母の構成体積割合)に若干の違いはあるが、石英, 正長石, 斜長石比による深成岩⁶⁾の分類に従えば、いわゆるGranite(花崗岩)に相当し、形成時代はいずれも地質時代の白亜紀の斑状花崗岩である。また、光学顕微鏡観察結果による構成鉱物の粒径は、ほぼ同じ0.2~3mm程度で、後述する各岩級区分における物理特性並びに弾性波速度も同等の値を示すことから岩石の風化状態にも大きな相違はないと考えられる。

3. 地盤特性

(1) 調査・試験方法

①広島地方

前報^{1), 2)}で詳細を報告しており、概要を述べる。原位置の含水比・単位体積重量は、ラジオアイソトープ(RI)計器による方法(JGS 1614-1995)で、また地盤のP, S波の測定は、地盤の弾性波速度検層法(JGS 1122-1995)に準拠して行った。不攪乱試料は、表土をはき取り、ブロックサンプリングによる土の乱さない試料の採取方法(JGS 1231-1995)で採取し、試料整形は凍結法⁷⁾で行った。室内力学試験は、飽和状態における等方圧密排水三軸圧縮試験(JSF T 524-1990)に準拠し、等方圧密及びせん断課程で繰返し載荷を実施した。供試体寸法は、直径5cm, 高さ10cmを標準とした。

②阿武隈地方

P, S波の測定は広島地方と同等の方法で行ったが、含水比・密度は不攪乱試料から室内試験(JSF T 121-1990, 191-1990)で測定した。なお、不攪乱試料は、地表から約30mの範囲でボーリング調査時にロータリー式三重管サンプラーによる土の乱さない試料の採取方法(JGS 1223-1995)で採取した。室内力学試験は、等方圧密排水三軸圧縮試験(JSF T 524-1990)(飽和状態)に準じ、供試体寸法は、直径5~8cm, 高さ10~16cmを標準とした。

$$(P/P_a)^m - (P_0/P_a)^m$$

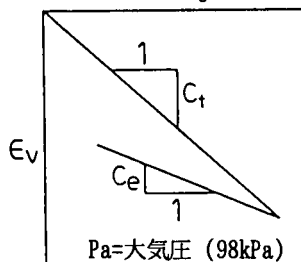


図-3 Ct, Ce, mの説明図

(2) 物理特性

表-2に物理定数及び弾性波探査結果の一覧を示す。なお、岩級区分は本四公団の岩盤分類⁸⁾に準じて区分を行った。

比重は両地点ともGs=2.7前後の値を示し大きな差は生じていない。また、湿潤単位体積重量・乾燥単位体積重量は岩級毎の平均値には明確な差がみられるが、調査地点毎の差及び変動係数(以下C.O.V.)は非常に小さい。なお、含水比は、阿武隈地方が広島地方よりも大きな値を示したが、試料採取方法の違い(ボーリング時の泥水の浸透)が一因として考えられる

一方、間隙比及びVp, Vsは岩級毎の平均値に明確な差がみられるが、岩級毎のC.O.V.は湿潤・乾燥単位体積重量と比較して2~5倍の差が生じている。間隙比やVp, Vsのバラツキが大きくなった要因は、地点毎の風化状態が初期の条件(割れ目の状態など)に大きく影響されることが一因として考えられる。

(3) 力学特性

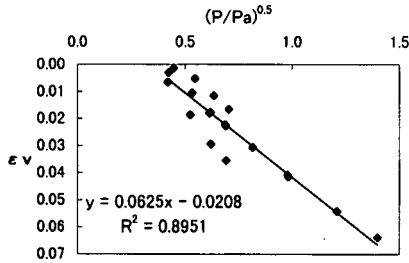
①等方圧縮特性

両地点における等方圧縮・除荷特性を示す係数Ct, Ce(図-3参照)の一覧を表-3に示す。Ct, Ceは、広島地方は等方圧縮試験から算定し、阿武隈地方はせん断試験前の等方圧縮試験結果から得られる体積ひずみε、と各拘束圧力Pの関係から図-3に示すCtのみを算定した(図-4, 5参照)。そして、

表-3 Ct, Ce 一覧

地方	岩級区分 パラメータ	DL		DM		DH	
		Ct	Ce	Ct	Ce	Ct	Ce
広島	データ数	5	5	-	-	5	5
	設定値	0.063	0.031	-	-	0.030	0.017
阿武隈	データ数	87	-	92	-	43	-
	推定値	0.040	-	0.028	-	0.020	-
	相関係数(%)	95	-	87	-	69	-

DL級 載荷(Ct)



DL級 除荷(Ce)

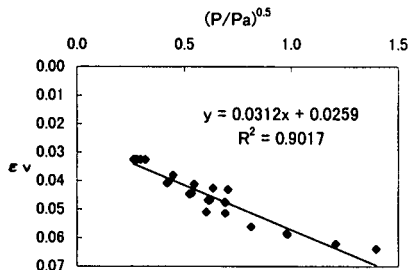


図-4(1) 等方圧縮試験結果(広島, DL)

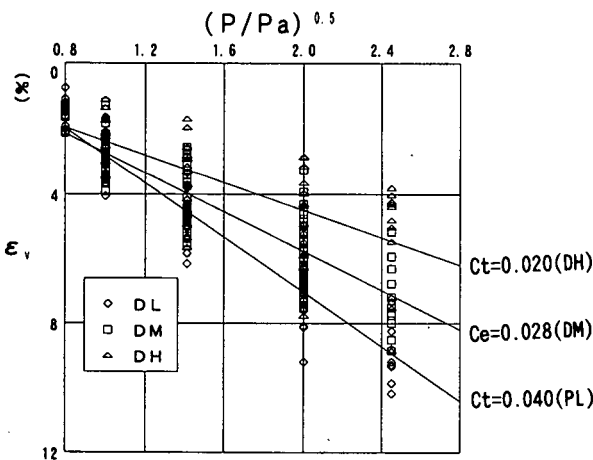
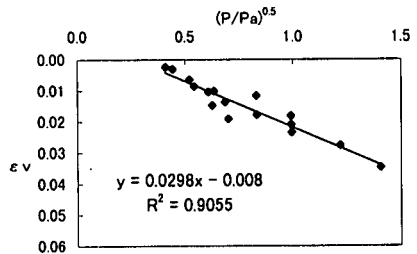


図-5 等方圧縮応力と体積ひずみの関係(阿武隈)

各岩級における Ct, Ce と間隙比の関係を図-6 に示した。なお、拘束圧の増加によるメンブレンペネトレーションの補正は Kramer の方法⁹⁾ で補正した。

DH級 載荷(Ct)



DH級 除荷(Ce)

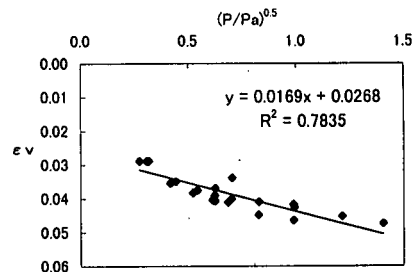


図-4(2) 等方圧縮試験結果(広島, DH)

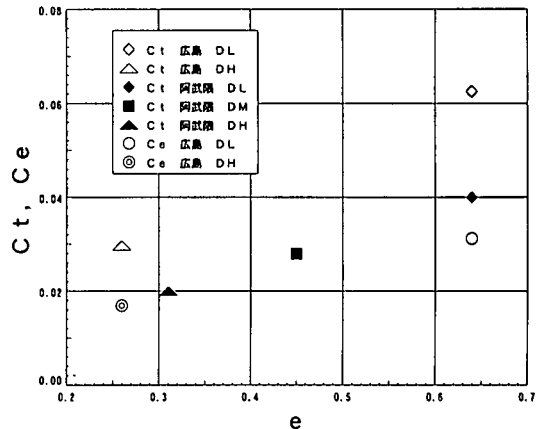


図-6 間隙比と Ct, Ce の関係

豊浦標準砂及び他の堆積砂の等方圧縮・除荷過程における P と ϵ_v の関係は、P の m 乗 ($m=0.3$) と ϵ_v に高い一次相関性の存在があり、係数 Ct, Ce は 10^{-3} のオーダーであることが報告¹⁰⁾ されている。一方、風化花崗岩は、P の 0.5 乗と ϵ_v に非常に高い一次相関関係が認められ、Ct には各岩級毎に明確な差が存在し、 10^{-2} のオーダーの値を示した。風化花崗岩は、比較的低い応力レベルで粒子破砕による高い圧縮性が多く報告¹¹⁾ されており、今回の結果も堆積砂と比較して大きな値を示した。

②せん断特性

図-7, 8 に広島及び阿武隈地方のせん断試験結

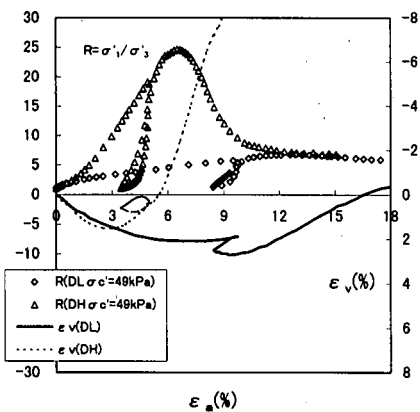


図-7 σ_1'/σ_3' , ϵ_v - ϵ_a 関係(広島, DL, DH)

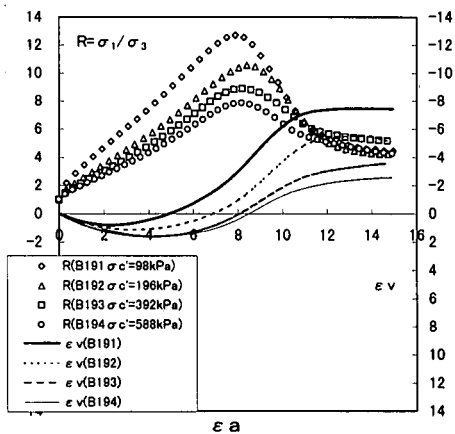


図-8(3) σ_1'/σ_3' , ϵ_v - ϵ_a 関係(阿武隈, DH)

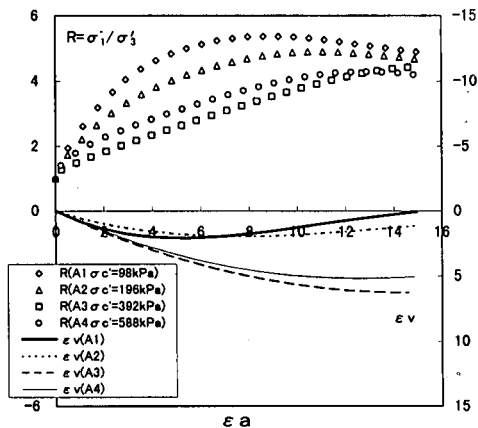


図-8(1) σ_1'/σ_3' , ϵ_v - ϵ_a 関係(阿武隈, DL)

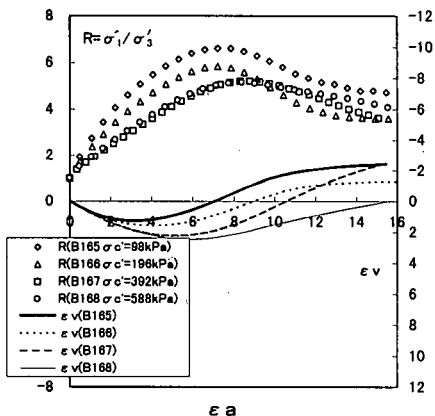


図-8(2) σ_1'/σ_3' , ϵ_v - ϵ_a 関係(阿武隈, DM)

のひずみレベルが大きい範囲における除荷過程で体積膨張が生ずる点である。この挙動は、砂分が多い中間土で、軸ひずみレベルが大きく、負のダイレイタンスを伴う場合などのケースで発生することが報告^{12), 13)}されている。今回の現象は、これらの類似点とほぼ一致する傾向を示すが、原因については今後の研究課題である。

最大主応力比 $R_t (\sigma_1'/\sigma_3')$ とその時点の体積ひずみ ϵ_v -軸ひずみ ϵ_a 関係の勾配 $D_t (d\epsilon_v/d\epsilon_a)$ を岩級及び拘束圧毎に整理した基本統計値の一覧を表-4, 5 に示す。 R_t の全体の平均値と岩級の関係は、広島地方は $R_t=6.1\sim 23.4$ 、阿武隈地区は $R_t=5.1\sim 9.4$ と岩級が新鮮になるにつれて増加する傾向を示す。一方、 D_t は、広島地方は $D_t=-0.36\sim -2.36$ 、阿武隈地区は $D_t=-0.17\sim -1.02$ と減少し、正のダイレイタンスが増加する傾向を示した。なお、岩級毎のバラツキの比較は、 R_t に大きな差はないが、 D_t は岩級が新鮮なほどバラツキが小さくなる。特に、 D_t のバラツキの特徴は、各岩級においても拘束圧が大きいほど大きくなる傾向 (C.O.V. (D_t , DL): 76.1% ($\sigma_3' < 196\text{kPa}$) \sim 233.3% ($\sigma_3' > 196\text{kPa}$)) がある。また、図-7, 8 に示すように、残留状態における各岩級毎の R は、両地方とも約 4~6 とほぼ一定であり、 R_t の増加は正のダイレイタンスの増加に依存している。

破砕性材料の場合、せん断特性 (内部摩擦角及びダイレイタンス特性) の拘束圧依存性が古くから指摘されている¹⁴⁾。今回の結果から、風化度のせん断特性への影響は、風化度と拘束圧が骨格構造の支持形態に影響し、摩擦特性よりもダイレイタンス特性とそのバラツキの程度に大きく及ぶことが指摘できる。

果の代表例を示す。応力比 σ_1'/σ_3' -軸ひずみ ϵ_a 関係は両地点ともひずみ硬化後軟化型を示し、体積ひずみ ϵ_v -軸ひずみ ϵ_a 関係は拘束圧が低いほど正のダイレイタンスの発生が顕著となり、両関係は岩級が新鮮なものほどその傾向は明瞭となった。なお、図-7 に示すせん断時の繰返し载荷の特徴は、DL

表-4 R_fの基本統計値一覧

地域	岩級区分	DL				DM				DH			
		ALL	50	100	200	ALL	50	100	200	ALL	50	100	200
広島	σ'_v (kPa)	ALL	50	100	200	ALL	50	100	200	ALL	50	100	200
	sample	5	3	1	1	-	-	-	-	5	2	2	1
	average	6.1	6.4	5.8	5.7	-	-	-	-	23.4	30.9	20.8	13.3
	Min.	5.2	-	-	-	-	-	-	-	13.3	-	-	-
	Max.	7.2	-	-	-	-	-	-	-	37.1	-	-	-
C.O.V.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
阿武隈	σ'_v (kPa)	ALL	<196	196	>196	ALL	<196	196	>196	ALL	<196	196	>196
	sample	42	16	11	15	71	23	19	29	43	10	11	22
	average	5.1	5.5	5.0	4.7	6.5	7.2	6.6	5.8	9.4	11.3	10.3	8.2
	Min.	3.8	4.3	3.7	3.6	4.4	5.1	4.5	4.4	2.9	8.4	8.0	2.9
	Max.	8.1	8.1	7.0	6.3	11.3	11.3	10.0	8.1	13.8	13.8	12.9	11.7
C.O.V.	18.2	15.8	18.2	18.0	23.2	22.2	24.2	17.3	23.3	14.3	14.7	23.4	

表-5 D_fの基本統計値一覧

地域	岩級区分	DL				DM				DH			
		ALL	50	100	200	ALL	50	100	200	ALL	50	100	200
広島	σ'_v (kPa)	ALL	50	100	200	ALL	50	100	200	ALL	50	100	200
	sample	5	3	1	1	-	-	-	-	5	2	2	1
	average	-0.36	-0.39	-0.39	-0.28	-	-	-	-	-2.36	-2.81	-2.06	-2.07
	Min.	-0.49	-	-	-	-	-	-	-	-2.86	-	-	-
	Max.	-0.23	-	-	-	-	-	-	-	-1.66	-	-	-
C.O.V.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
阿武隈	σ'_v (kPa)	ALL	<196	196	>196	ALL	<196	196	>196	ALL	<196	196	>196
	sample	42	16	11	13	66	21	18	27	41	10	11	20
	average	-0.17	-0.26	-0.17	-0.08	-0.47	-0.57	-0.47	-0.37	-1.02	-1.22	-1.15	-0.88
	Min.	-0.94	-0.94	-0.58	-0.41	-1.14	-1.14	-1.00	-0.96	-1.73	-1.73	-1.48	-1.39
	Max.	0.19	-0.02	0.12	0.19	-0.09	-0.24	-0.14	-0.09	-0.39	-0.72	-0.71	-0.39
C.O.V.	117.0	76.1	117.5	233.3	53.7	45.3	52.4	54.6	32.7	27.3	21.2	34.1	

せん断時における平均主応力 $\text{Log } p'$ -間隙比 e の関係を図-9に示す。同図には、北村ら¹⁵⁾やVaughn¹⁶⁾により指摘されている粒子破碎が卓越する降伏応力前後の圧縮曲線の関係も付記している。DLのせん断時の $\text{Log } p'$ - e の関係は、 $\sigma'_v < 392\text{kPa}$ の範囲ではせん断初期にほぼ圧縮曲線に近い勾配を辿り、その後、正のダイレイタンスーが発生し、徐々にその発生率が低下する挙動を示す。一方、 $\sigma'_v \geq 392\text{kPa}$ の範囲では圧縮曲線とほぼ並行か、それよりもやや内側に傾く挙動を示している。風化花崗岩のせん断特性は、粒子破碎が卓越する降伏応力前は処女載荷においても粘性土の過圧密的挙動を応力後は正規圧密的挙動を示した。筆者らは、風化花崗岩の圧縮、せん断特性が各構成鉱物の風化度とそれらの骨格構成への寄与度に支配されること²⁾を指摘した。今回の結果は、DM、DHのより高拘束圧下での結果を必要とするものの、粒子破碎の卓越する降伏応力前後の挙動の差は、粒子破碎の影響による初期骨格構造の差に起因する可能性を示唆している。

4. 構成モデル(t_{ij} -sand model)の適用

前章までの結果は、風化花崗岩の降伏応力前後の圧縮、せん断特性が粒子破碎の影響による初期骨格構造に支配されることを示し、降伏応力前の処女載荷の挙動をシミュレーションする場合には正のダイレイタンスー挙動を表現できるモデルの適用が必要となった。そこで本報告では、これらの表現が可能な砂の弾塑性モデル(t_{ij} -sand model)を用いて風

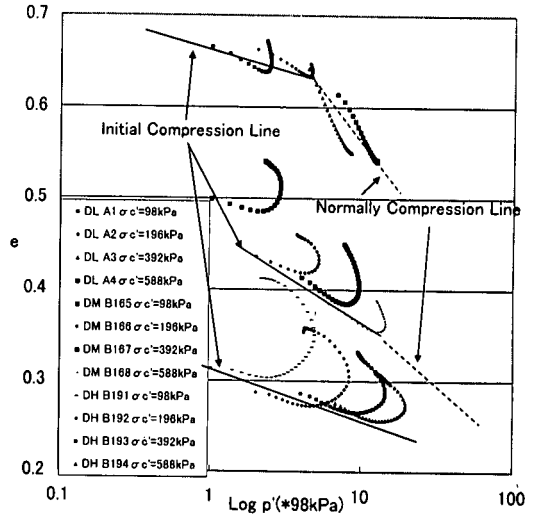


図-9 せん断時の主応力と間隙比の関係

表-6 設定パラメータ一覧

岩級区分	DL		DM		DH	
	広島	阿武隈	広島	阿武隈	広島	阿武隈
Ct	0.062	0.040	-	0.028	0.030	0.020
Ce	0.031	0.022	-	0.015	0.017	0.011
m	0.5	0.5	-	0.5	0.5	0.5
Rf	5.8	5.0	-	7.2	15.1	11.3
Df	-0.4	-0.3	-	-0.6	-1.7	-1.2
α	0.65	0.70	-	0.80	0.60	0.65

化花崗岩のせん断挙動をシミュレーションし、モデル並びに各岩級毎の設定パラメータの適用性を考察した。なお、筆者らの一部¹⁷⁾は、砂質土地盤の変形解析に対する t_{ij} -sand model の適用性を検討し、当モデルによる簡易解析手法を提案している。

シミュレーションの対象は、拘束圧 98kPa の処女載荷領域の等方圧密排水三軸圧縮試験結果とし、設定パラメータの一覧を表-6に示す。パラメータの設定方法は、広島地方は実験結果とし、阿武隈地方は拘束圧 196kPa 以下の各実験結果の平均値とした。なお、阿武隈地方の Ce は、DLを対象とした平板載荷試験の再載荷時の沈下曲線から得られる変形係数からDLのCeを逆算し、DL以外のCeは、DLのCt/Ceと各岩級のCtから設定した。

また、 t_{ij} -sand model における応力パラメータ (t_N, t_S) とひずみ増分パラメータ ($d\epsilon_{SMP}^{*p(AF)}, d\gamma_{SMP}^{*p(AF)}$) を用いた応力比 \sim ひずみ増分比関係は、以下の一次式で仮定されている⁴⁾。

$$Y = \frac{X_f - X}{\alpha} + Y_f$$

$$X \equiv t_S / t_N, Y \equiv d\epsilon_{SMP}^{*p(AF)} / d\gamma_{SMP}^{*p(AF)}$$

しかし、図-10に示すように、風化花崗岩の応力比 \sim ひずみ増分比関係は、正のダイレイタンスーが発生する時点（軸ひずみ $\epsilon_a = 3\sim 5\%$ ）からピーク強度までに、一次相関から乖離して応力比が低下する傾向を示す。筆者ら²⁾は、風化花崗岩の応力比 \sim ひずみ増分比関係の非線形性と正のダイレイタンスー特性の発生から破壊までの挙動が比較的粒子が賢固な石英や正長石に支配される可能性を報告している。

以上の結果は、厳密にはせん断初期と正のダイレイタンスー発生後において、ダイレイタンスー特性における差異の存在を示すものであり、原因としては、粒子破碎によるダイレイタンスーの抑制と密実化が考えられる。しかし、検討に際しての α は、当モデルでは一次相関が仮定され、また、初期とピーク強度までの α には大きな差異が生じていないことから、すべてのパラメータのバランスを考慮し、ピーク強度までの平均的な値を設定した。

図-11, 12に応力比 R (σ'_1/σ'_3)、体積ひずみ ϵ_v -軸ひずみ ϵ_a 関係の実験結果とシミュレーション結果を示す。

阿武隈地方の各岩級毎における両者の比較では、シミュレーション結果はピーク強度に至るまでのひずみ硬化及び正のダイレイタンスー発生における平均的な挙動を表現している。一方、広島地方は、DLはほぼ一致した結果が得られたが、DHではせん断初期において実験値の軸ひずみが大きくなる傾向にあり、不一致が見られた。広島地方の試料は、シーティングジョイントの影響からせん断初期に大きな載荷方向の圧縮性が卓越する可能性があり、これがせん断初期の不一致の一因と推定される。

以上の結果から、不連続面の影響が少ない場合の風化花崗岩のピーク強度までのせん断変形挙動の評価に対し、 t_{ij} -sand model 及び今回設定した各岩級毎のパラメータを用いたシミュレーションの有効性を示すことができた。

5. まとめ

前章までの結果から、広島及び阿武隈地方の風化花崗岩の地質的な観察結果の同等性、並びに広島地方のサンプル数は少ないが、両地方の物理特性及び静的な力学試験結果がほぼ一致する範囲であることを示した。さらに、風化花崗岩の岩級毎の静的な変形挙動に対しては、弾塑性構成モデル (t_{ij} -sand model) と岩級毎に設定したパラメータによるシミュレーションが有効であることを示せた。これらの結果は、風化花崗岩の地盤特性には、母岩の

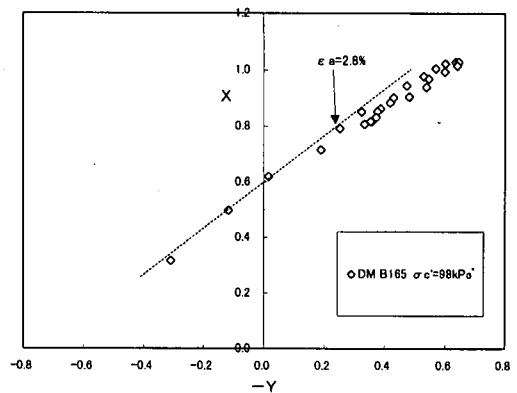


図-10 応力比 ($X = t_{ij} / t_N$) と塑性ひずみ増分比パラメータ ($Y = d\epsilon_{SMP}^{*p(AF)} / d\epsilon_{SMP}^{*p(AF)}$) の関係

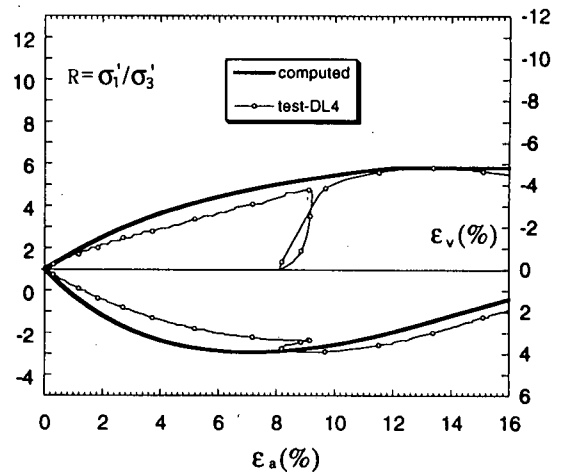


図-11(1) 実験値とシミュレーション結果の比較 (広島, DL)

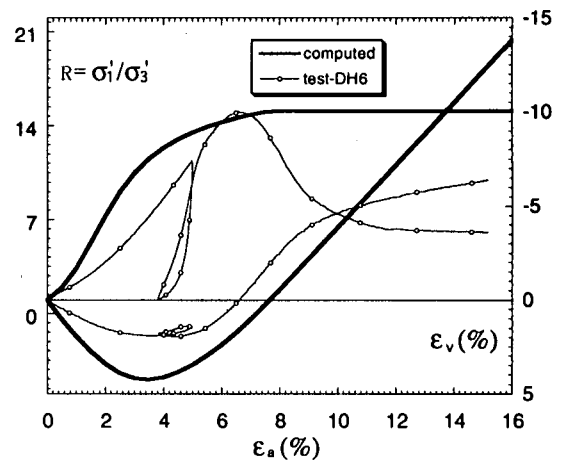


図-11(2) 実験値とシミュレーション結果の比較 (広島, DH)

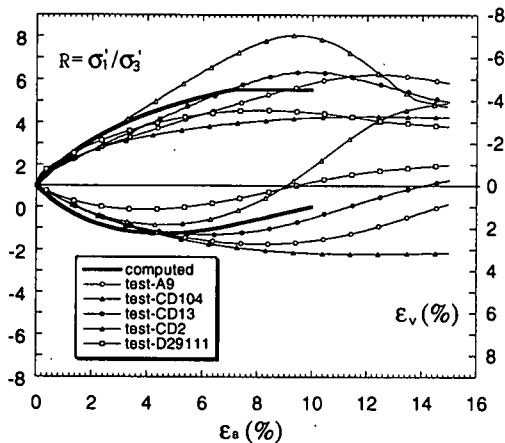


図-12(1) 実験値とシミュレーション結果の比較
(阿武隈, DL)

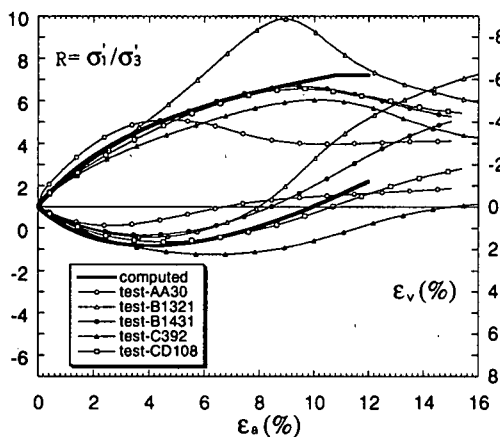


図-12(2) 実験値とシミュレーション結果の比較
(阿武隈, DM)

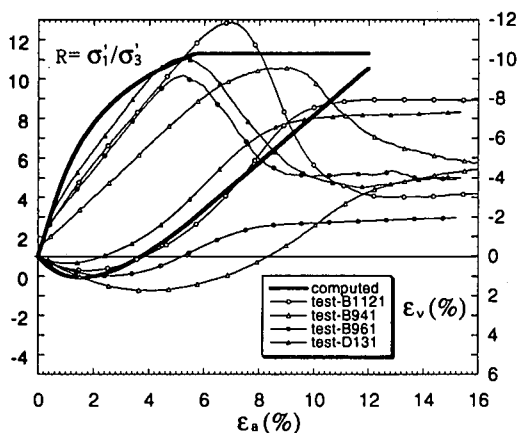


図-12(3) 実験値とシミュレーション結果の比較
(阿武隈, DH)

形成過程と風化性状を特定することで、有意な同等性が存在することを示唆している。以下に検討結果のまとめを述べる。

(1) 阿武隈地方の花崗岩は花崗閃緑岩と黒雲母花崗岩から成り、表層から 20m 程度は強風化を受け「マサ化」していた。広島地方との比較では、主構成鉱物のモード組成に若干の違いはあるが、母岩の形成時代、構成鉱物の粒径及び風化形態に大きな違いはみられなかった。

(2) 広島及び阿武隈地方の花崗岩の地盤特性(物理・力学)は、瀬戸内海の花崗岩を基準とした本四公団の岩盤分類を適用することで、ほぼ妥当な岩級区分が可能である。

(3) 風化花崗岩の圧縮、せん断特性は、粒子破碎の卓越する降伏応力前後の初期骨格構造の影響が大きい。また、圧縮、せん断特性には明確な岩級毎の差が生じ、特に風化度の影響は D_f とそのパラッキ(変動係数)に大きく影響する。

(4) t_{ij} -sand model による処女載荷領域におけるせん断試験結果のシミュレーションは、広島・阿武隈地方ともに破壊に至るまではほぼ良好な一致を示し、弾塑性モデル及び設定パラメータの有効性を示せた。

謝辞：今回の広島地方の現地調査に当たり、(株)フジタ：平野訓相氏、(株)陸地コンサルタント：三上淳氏、広島大学工学部技官：山本博氏、広島大学の院生・学生の方々、室内実験では広島県：竹岡佳宏氏(元広島大学)に多大なご協力をいただきました。また、シミュレーションでは、名古屋工業大学：中井照夫教授、基礎地盤コンサルタント(株)：阪上最一博士に貴重なご助言をいただきました。また、研究の一部は、平成9および10年度文部省科学研究費補助金(課題：風化残積土の粒子破碎と圧縮性に関する微視的研究、課題番号：09650541、代表者：日下部治)の交付を受けた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 服部隆行, 北川隆司, 瀬戸一法, 低引洋隆, 日下部治: 風化した広島型花崗岩での一原位置試験, 土木学会論文集, III-42, pp.359-368, 1998.
- 2) 服部隆行, 瀬戸一法, 坂口賢明, 北川隆司, 日下部治: 風化した広島型花崗岩の力学特性, 土木学会論文集, III-42, pp.1-10, 1998.

- 3) 服部隆行, 日下部治, 低引洋隆: まさ土の工学的性質に関する一考察, 土木学会第48回年次学術講演会, pp.924-925, 1993.
- 4) Nakai, T.: An isotropic hardening elastoplastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 119-137, 1989.
- 5) 渡辺岩井, 午来正夫, 黒田吉益, 大野勝次, 砥川隆次: 阿武隈高原の火成活動-阿武隈高原の地質学的岩石学的研究(その3), *地球科学*, 24, p.11, 1955.
- 6) IUGS: Plutonic rocks, Classification and nomenclature recommended by the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks, *Geotimes*, Oct., 26-32, 1973.
- 7) 阿部慎太郎, 小野寺勇, 萩原敏行, 夫成紀: 礫混じり砂地盤のブロックサンプリングと凍結による運搬・成形, 第28回土質工学研究発表会, pp.215-218, 1993.
- 8) 日本応用地質学会: 岩盤分類-応用地質特集号-1, 応用地質特集号, p.93, 1984.
- 9) Steven, L., Kramer, N. and Sivaneswaran: Stress-Path-Dependent Correction for Membrane Penetration, *J. Geotech. Eng.*, Vol. 115, No. 12, pp.1797-1804, 1989
- 10) 阪上最一, 柳浦良行, 山田真一, 榎本雅夫: 三軸圧縮条件下における細やかな粒径の砂の力学特性, 土木学会第50回年次学術講演会, III-1, pp.209-201, 1995.
- 11) 例えば, 村田秀一, 兵藤正幸, 安福規之: 風化度に着目した乱さないまさ土の圧縮・せん断特性, 土木学会論文集, No.382/III-7, pp.131-140, 1987.
- 12) Bishop, A.W. and Henkel, D. J.: Pore Pressure Changes during Shear in Two Undisturbed Clays, *Proc. 3rd. I.C.S.M.F.E.*
- 13) 中瀬明男, 日下部治, 大根他秀明: 粘性土のせん断特性に及ぼす粒度の影響(第1報), 第11回土質工学研究発表会, pp.251-254, 1976.
- 14) 三浦哲彦, 山内豊総: 高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について, 土木学会論文集, No.193, pp.69-79, 1971.
- 15) 北村良介, 春山元寿, 三隅浩二: 中・低圧下におけるシラスの力学特性, 土と基礎, Vor.32, No.2, pp.17-21, 1984
- 16) Vaughan, R.R.: Mechanical and Hydraulic Properties of Tropical Lateritic and Saprotic Soils Particularly as Related to their Structure and Mineral Components, *Proc. 1st Int. Conf. Geomech. Tropical, Lateritic Saprolic Soils*, pp.231-263, 1985.
- 17) Sakajo, S., Xu, L., Nakai, and Hattori, T.: A Simplified Numerical Analysis for Pull-out Resistance of A Belled Pier in Sand Using Elasto-plastic Model, *Soils and Foundations*, (投稿中)

(1998.3.6 受付)

COMPARISONS OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF WEATHERED GRANITES FROM TWO DIFFERENT SITES

Takayuki HATTORI, M. M. GALER, Ryuji KITAGAWA, Lianmin XU,
Tamotsu OGAWA and Osamu KUSAKABE

This paper describes the topographical and geological observations, degree of weathering and laboratory tests on the weathered granites in the two sites of Japan, one in Hiroshima, and other in Abukuma. The weathered granites in both sites were clearly classified into DL, DM and DH according to the rock classification of Honshu-Shikoku Bridge Authority and the stress-strain behavior of the weathered granites were controlled by the soil structure influenced in the particle crushing. The paper also discusses the comparisons of the mechanical characteristics to simulate the stress-strain behavior of the weathered granites with elasto-plastic soil model, t_{ij} -sand model. The simulations show the good agreement until the peak strength for the both case. The results make it clear that the influence of the local conditions such as rockforming minerals and weathering environment are important to the mechanical characteristics on the weathered granites.